



# Détection des cavités minières par sismique réflexion haute résolution (SHR). Cas d'une mine de charbon

Lynda Driad-Lebeau

## ► To cite this version:

Lynda Driad-Lebeau. Détection des cavités minières par sismique réflexion haute résolution (SHR). Cas d'une mine de charbon. Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées: séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France. pp.18-31. ineris-00976164

**HAL Id: ineris-00976164**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00976164>**

Submitted on 9 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# DÉTECTION DES CAVITÉS MINIÈRES PAR SISMIQUE RÉFLEXION HAUTE RÉOLUTION (SHR) – CAS D'UNE MINE DE CHARBON

Lynda DRIAD-LEBEAU<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>INERIS, Ecole des Mines de Nancy, France Email : lynda.driad-lebeau@ineris.fr

## Résumé

L'étude présentée ici s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche sur l'analyse, la prévention et la maîtrise des mouvements de terrains liés à la présence de cavités souterraines, financé par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. L'un des volets de ce programme est consacré notamment à l'évaluation des techniques nouvelles pour la Localisation et la Reconnaissance de l'Etat des Cavités Souterraines. La technique de la Sismique réflexion Haute Résolution (SHR) a été testée sur le site sous-miné de Gréasque (Provence). L'application de la SHR sur ce site a permis d'atteindre des profondeurs d'investigation variant de 10 à 200 m, avec une résolution (latérale et verticale) de l'imagerie SHR satisfaisante au regard des objectifs. Depuis une dizaine d'années, la sismique réflexion haute résolution a connu un vaste champ d'application dans des contextes géologiques différents et pour des objectifs variés. Dans la plupart des cas expérimentaux, la SHR a fait preuve d'un potentiel prometteur pour la détection des cavités souterraines dans le domaine minier et celui du Génie Civil.

Ce papier présente la synthèse des résultats d'une expérimentation SHR réalisée sur le site de Gréasque et plus particulièrement dans la zone dite de « Rocher Bleu » caractérisée par la présence d'une ancienne mine de charbon souterraine exploitée par chambres et piliers. L'analyse d'un grand profil 2D réalisée à l'aplomb de cette zone a permis d'identifier les réflecteurs sismiques des différentes couches traversées par le profil SHR, les zones vierges et exploitées ainsi que la trace d'un ancien effondrement.

Les résultats obtenus confirment le potentiel de la technique SHR pour l'auscultation des ouvrages souterrains et notamment pour la localisation et la caractérisation des cavités souterraines.

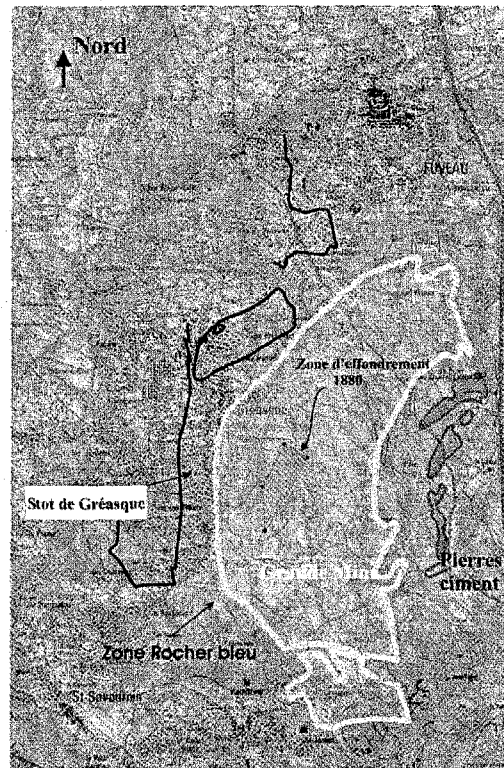
## 1. Contexte et objectifs

L'évaluation du risque d'effondrement dans les zones contenant des cavités naturelles (dissolution de gypse, calcaire) ou anthropiques (carrière et mines exploitées) est une démarche particulièrement complexe. La connaissance des caractéristiques des terrains encaissants et le comportement à long terme des cavités souterraines représente une information importante pour le contrôle de ces phénomènes d'effondrements.

Les recherches portant sur les techniques géophysiques visant à détecter les cavités souterraines sont, plus que jamais, d'actualité. Parmi ces techniques, la sismique

réflexion haute résolution a fait l'objet, ces dernières années, d'un large champ d'application pour l'imagerie du sous-sol proche (domaine des hautes fréquences). Une démarche d'évaluation précise de la technique SHR a été conduite afin de déterminer sa capacité à localiser d'anciennes cavités minières souterraines (chambres et galeries) et à reconnaître l'état de leur recouvrement. Elle est basée sur l'expérimentation menée sur un site sous-miné et inaccessible, mais pour lequel des informations liées à l'exploitation minière et à la géologie étaient disponibles.

Le site sous-miné sélectionné est situé en Provence près de la commune de Gréasque (Figure 1).



*Figure 1. Situation du site minier – Commune de Gréasque (Provence).*

Il existe deux types d'exploitations sur ce site : mine de charbon dans la zone dite de « Roche Bleu » exploitée essentiellement par la méthode des chambres et piliers et dans la partie Est, très anciennes carrières souterraines de pierre à ciment (calcaire marneux). Le choix du site expérimental a été conditionné par la possibilité de mener une investigation dans les conditions suivantes :

- le site sous-miné est constitué de deux zones (mine de charbon, carrière de pierre à ciment) relativement proches mais de configurations d'exploitation différentes (exploitation par chambre et piliers, galeries) ;

- connaissance préalable de l'existence de cavités à faible et moyenne profondeur (de 20 à 200 m) ;
- connaissance de phénomènes d'effondrement dans les galeries ou les chambres ;
- site facile d'accès et disponibilité d'informations géologiques suffisamment complètes pour être en mesure de valider ou d'infirmer les interprétations SHR ;
- configuration géologique favorable à la technique SHR, avec en particulier des horizons réguliers, et un bon contraste de vitesse entre les différentes interfaces (charbon/calcaire).

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons particulièrement aux travaux réalisés dans les anciennes exploitations de charbon situées à des profondeurs allant de quelques mètres à 200 m. L'objectif des investigations SHR menées sur ce site est double :

- 1) localiser les vides potentiels des galeries exploitées de la couche de charbon dite 'Grande Mine' et déterminer l'état du recouvrement (zone effondrée ou non) ;
- 2) identifier dans la mesure du possible, la trace sismique d'un effondrement survenu en 1879 dans les anciens travaux.

## **2. Site expérimental**

### **2.1 Cadre géologique et minier du site**

La zone étudiée se situe dans le bassin de l'Arc qui a fait l'objet, depuis plusieurs siècles, de l'exploitation de couches de lignite d'âge Crétacé supérieur.

Ces bancs de lignite se sont déposés en milieu lacustre carbonaté lors du Campanien (Crétacé supérieur).

Ils sont situés au sein d'un étage géologique connu localement sous le nom de Fuvélien. Il s'agit de bancs de calcaire généralement massifs présentant plusieurs alternances de bancs de lignite de puissance pluridécimétrique à métrique (Durand et al, 1989).

L'ensemble des couches de lignite fut plus ou moins exploité artisanalement durant le XVIII<sup>ème</sup> siècle, principalement au niveau des affleurements. Seules les quatre plus puissantes, qui sont également les plus profondes, continuèrent à être exploitées en souterrain durant les XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles (Figure 2).

La plus ancienne des couches, qui est aussi la plus épaisse, se nomme la « Grande Mine ». C'est elle qui a fait l'objet de l'exploitation la plus intensive sur l'ensemble du bassin.

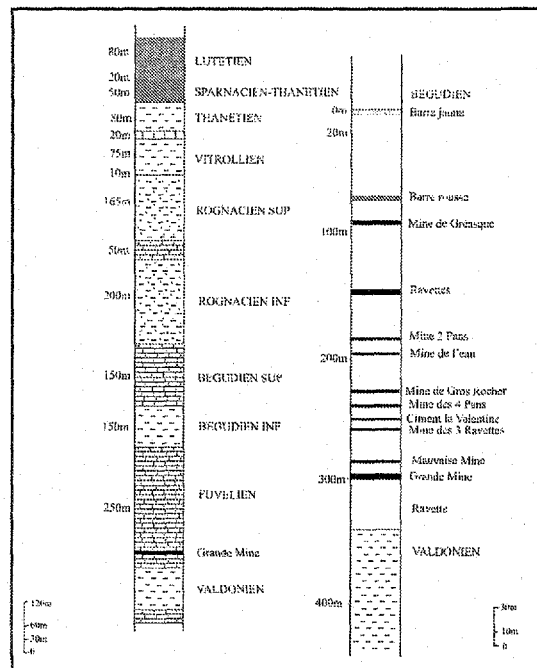


Figure 2. Stratigraphie du site minier. Le log de droite indique les différentes couches de lignite, dont la Grande Mine.

La très grande majorité des travaux menés par chambres et piliers dans le bassin de Provence l'a été au sein de cette couche, d'une puissance moyenne de 2 mètres. Dans la zone minière du site dit « Rocher Bleu » qui fait l'objet de cette étude (Figure 1), seules les couches Grande Mine et Quatre Pans ont été exploitées. On note que l'exploitation de la couche Quatre Pans est très peu développée et limitée à la partie sud du champ d'exploitation.

## 2.2 Evènement principal

Les recherches d'informations entreprises sur l'historique des exploitations du bassin houiller de Provence ont permis de mettre en évidence un seul évènement majeur ayant affecté les anciens travaux menés par chambres et piliers abandonnés. Il s'agit de l'effondrement ayant pris naissance dans le secteur de l'exploitation du « Rocher Bleu », effondrement qui s'est produit brutalement dans la nuit du 29 au 30 avril 1879 au sein de la couche Grande Mine. La situation approximative de la zone de l'effondrement est indiquée sur la figure 1. Les circonstances de l'effondrement seraient liées à un sous-dimensionnement de certains piliers, c'est à dire à un taux de défruitement localement trop élevé.

### **3. Expérimentation SHR**

Pour répondre aux objectifs de l'étude, un profil SHR long de 2 km a été réalisé sur le site de Rocher Bleu à l'aplomb des vieux travaux miniers suivant la direction Est-Ouest (Figure 3). L'acquisition et le traitement des données ont été réalisés par la société EOSYS selon les recommandations de l'INERIS. La source émettrice est un vibroacoustique capable de générer des fréquences allant jusqu'à 200 Hz. La réception des signaux a été assurée par des géophones 10-300 Hz implantés le long du profil tous les 2 m. Les enregistrements ont été effectués à l'aide d'un laboratoire POLYSEIS 24 bits 96 voies.

Le profil SHR traverse un forage destructif réalisé dans le cadre du projet. Ce forage a traversé toutes les couches de lignite indiquées sur la figure 2 et a débouché dans la galerie de la Grande Mine à environ 132 m de profondeur (toit de la couche GM). Par ailleurs, le forage a traversé des vides inattendus à moins de 10 m de profondeur, liés probablement à l'exploitation de la mine de Gréasque.

Le traitement et l'analyse des données, basés sur la méthode de la mise en CDP (Common Depth Point), ont permis d'obtenir des images SHR des structures souterraines avec un rapport signal/bruit satisfaisant. Les paramètres d'acquisition du profil choisi suivant des objectifs spécifiques de l'étude sont résumés dans le tableau 1.

### **4. Analyse et interprétation des données**

#### **4.1. Modèle géologique**

L'identification des réflecteurs SHR peut s'avérer difficile sans un calage de la sismique avec un modèle géologique. Dans le cas de notre étude, la disponibilité des données géologiques a permis de calculer un modèle 2D afin d'identifier les réflecteurs sismiques associés aux différentes couches traversées par les ondes sismiques. La construction de ce modèle est basée sur les données suivantes :

1. levé géologique détaillé des affleurements (charbon, calcaire...) et des valeurs de pendage mesurées. Ce travail a été réalisé par deux géologues ;
2. données du sondage ayant atteint toutes les couches de charbon dont la Grande Mine ;
3. affleurements de la Mine de Gréasque près du sondage et position du niveau des pierres à ciment ;
4. épaisseurs des formations mesurées dans le sondage.

Ce modèle a permis de calculer une coupe en profondeur des horizons sismiques. La figure 4a représente le modèle géologique global utilisé pour estimer la position des réflecteurs qui devraient être observés sur une section sismique.

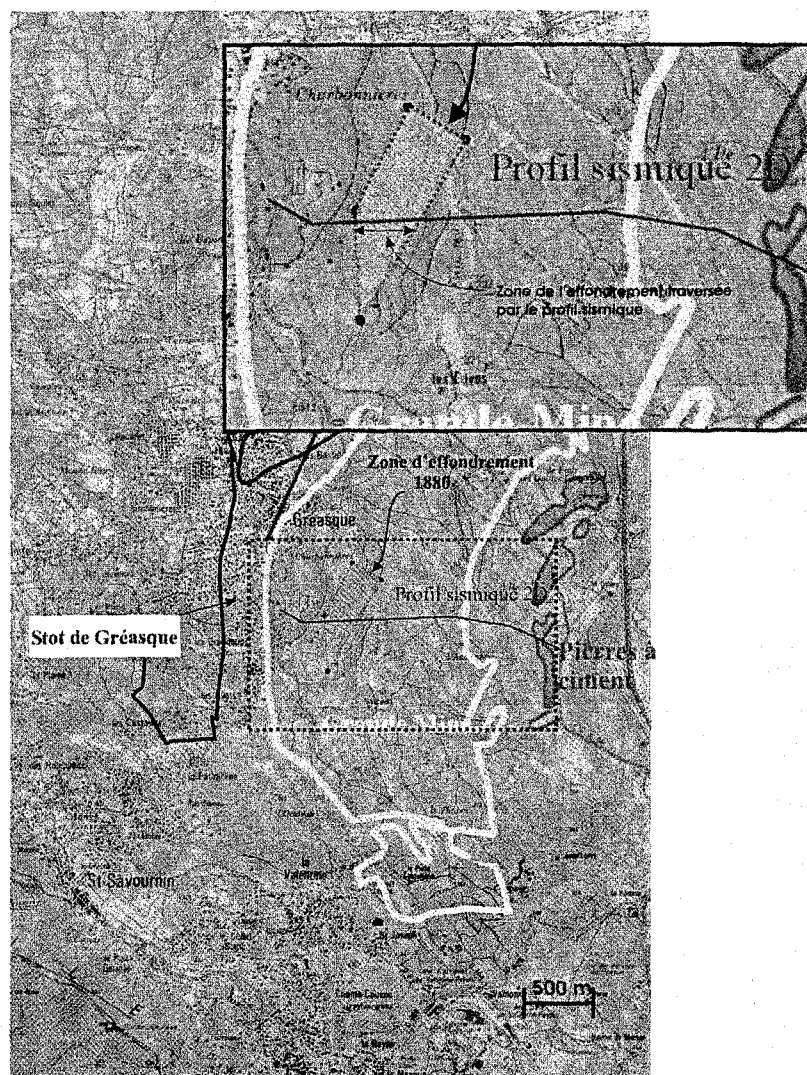


Figure 3. Localisation du profil SHR par rapport au site minier.

Longueur du profil 2D (m)	Espacement géophones (m)	Espacement entre CDP (m)	Fréquences exploitées (Hz)	Résolution latérale à 130 m (m)	Résolution verticale (m)
2000	2	1	50-125	36	5,5

Tableau 1 : Paramètres d'acquisition du profil SHR.

#### **4.2 Modèle de vitesse**

Pour les besoins de l'interprétation de la section sismique en terme de profondeur, un modèle de vitesse a été établi à partir des données issues d'un profil sismique vertical réalisé au niveau du forage (ces travaux ne sont pas présentés dans ce papier). Un maillage 3D de ces vitesses a été construit à partir du modèle géologique (Figure 4b). L'analyse conjointe des deux modèles (vitesse et géologique) a permis de réaliser une interprétation de la section sismique du profil 2D.

#### **4.3 Détection des cavités souterraines par SHR**

La détection des cavités souterraines par la méthode sismique devient possible grâce aux perturbations qu'elle entraîne sur l'image sismique du sous-sol. Ces perturbations apparaissent essentiellement sous deux formes :

- les réflexions d'ondes sur le toit des cavités, constituant les signes directs, interfèrent avec les signaux des couches géologiques (Piwakowski et Shahrour, 1998) et conduisent à l'apparition d'anomalies dans la coupe sismique (affaiblissement des amplitudes, modification de leur contenu spectral, apparition de nouveaux signaux...). Ces réflexions directes sont caractérisées par des amplitudes relativement faibles ou comparables à celles des signaux provenant des couches géologiques avoisinantes, la détection d'une cavité par ce moyen est donc souvent difficile (Piwakowski, 1989 ; Eiselt et Shahrour, 1992) ;
- la présence d'une cavité perturbe la propagation des ondes. Ces perturbations génèrent des zones de masquage au sein des réflecteurs des couches géologiques situées au-dessous de la cavité (effet de masquage) ou des retards additionnels de ces réflecteurs. Ces effets présentent les symptômes indirects caractéristiques de la présence de cavités (Cook, 1965) et peuvent s'avérer assez aisément identifiables sur un profil sismique (Moreaux et al, 1996, Alleman, 1996, Piwakowski et al, 1998, Driad et Piwakowski, 2002).

Actuellement, la détection des cavités souterraines à l'aide de la SHR utilise essentiellement « l'effet de masquage ».



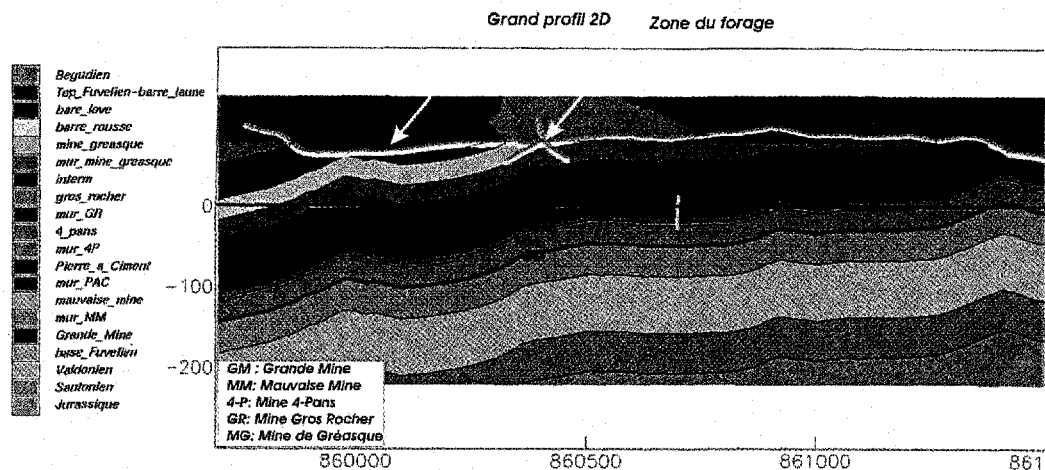


Figure 4a. Coupe en profondeur du modèle géologique de la zone Rocher Bleu.

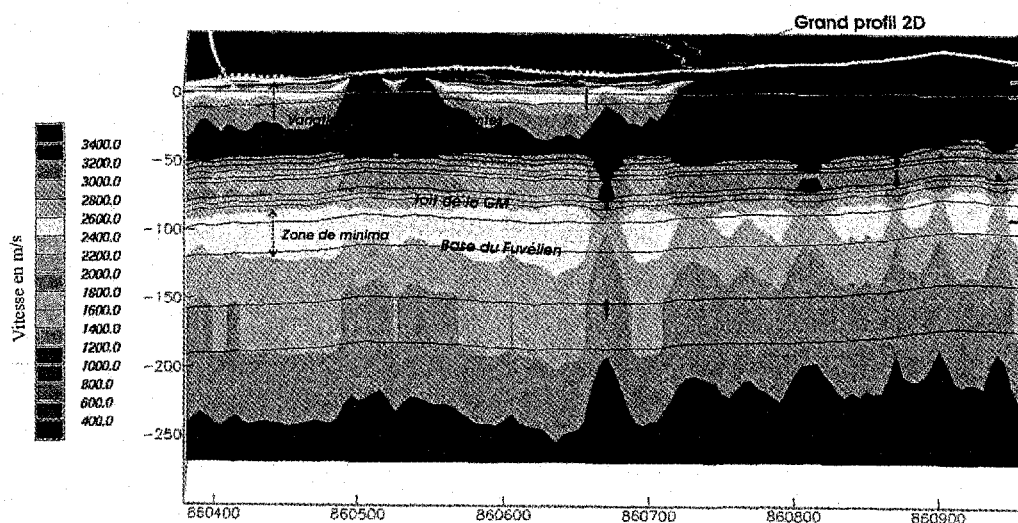


Figure 4b. Coupe du champ de vitesses moyennes déterminé à parti d'un maillage 3D.  
Les vitesses moyennes sont calculées verticalement entre la surface  
et le toit de chaque couche.

## 5. Résultats

L'image globale du profil montre qu'il est possible de suivre, sur toute la section, les réflecteurs associés à la couche Grande Mine et Gros Rocher (couche non exploitée). L'affaiblissement des signaux souvent observé sur le réflecteur de la Grande Mine reflète les effets de son exploitation. Il est possible de subdiviser la section 2D en 6 zones distinctes de par leur signature sismique et leur position par rapport au plan de mine (Tableau 2, Figure 5).

<b>Zone</b>	<b>Situation/section 2D (n° trace Est-Ouest)</b>	<b>Identification SHR</b>	<b>Interprétation</b>
1	1083 - 913	Réflecteurs continus et visibles en profondeur	Zone vierge
2	913 - 672	Réflecteurs discontinus, perturbation du recouvrement induite par les cavités à moins de 10 m, affaiblissement du niveau d'amplitude de la Grande Mine	Zone exploitée, existence de cavités de la Mine de Gréasque détectées par forage
3	673 - 473	Réflecteurs visibles, perturbations des signaux liées à des cassures verticales	Zone exploitée et effondrée en 1879
4	463 - 423	Succession continue des réflecteurs visibles en profondeur, pas de perturbations	Stot de protection d'environ 40 m de large
5	423 - 253	Réflecteurs discontinus, affaiblissement du niveau d'amplitude de la Grande Mine et des réflecteurs profonds, masquage de réflecteurs à certains endroits	Zone exploitée + effets de cavités situées au-dessus de la Grande Mine
6	253 - 183	Reprise de la continuité des réflecteurs, réapparition des réflecteurs profonds	Zone vierge

*Tableau 2. Identification SHR de 6 zones distinctes le long de la ligne 2D.*

### **5.1 Analyse de la zone du forage (zones 1 et 2)**

L'image SHR met en évidence l'effet des cavités découvertes par le forage situées à moins de 10 m de profondeur. En effet, les réflecteurs localisés entre les traces 845 et 870 présentent des perturbations de signaux et sont nettement abaissés (retard induit par les cavités, Figure 6). De plus, le niveau bas des amplitudes de la Grande Mine ainsi que la disparition des réflecteurs profonds montrent que cette zone a sans aucun doute été exploitée. Du côté Est, dans la zone vierge (zone 1), les réflecteurs sont bien définis et présentent un caractère régulier et continu des faciès. Cet état SHR des réflecteurs témoignerait d'un recouvrement sans perturbation.

### **5.2 Analyse de la zone d'effondrement**

La partie de la section comprise entre les traces 473 et 673 est caractérisée par l'apparition d'une succession de réflecteurs continus et visibles en profondeur (Figures

5 et 8). De plus, cette section, d'environ 200 m de large, est bordée par deux failles verticales qui ont induit des perturbations des signaux ainsi que des décalages verticaux des réflecteurs. Nous avons donc analysé la possibilité que cette anomalie soit liée à l'effondrement survenu en 1879. Cette interprétation est basée sur les observations suivantes :

- cette partie du profil est localisée exactement dans la zone de l'effondrement de 1879 (Figure 3) sur sa partie large de 200 m. Celle-ci est équivalente à l'extension latérale de l'anomalie SHR ;
- l'effondrement se serait produit de manière brutale en un seul bloc suivant deux ruptures verticales. Les cavités issues des exploitations ont été remblayées, la trace SHR le confirme puisque aucun effet de présence de cavité n'est observé (réflecteurs continus et visibles en profondeur) ;
- description de la manifestation liée au phénomène d'effondrement d'après l'article de M. VILLOT (Inspecteur Général des Mines) de l'année 1879.

La synthèse de ces observations suggère fortement que l'anomalie SHR observée dans la zone 3 du profil 2D représente l'effet de l'effondrement de 1879.

### **5.3 Analyse de la zone 4**

Dans la partie de la section comprise entre les traces 423 et 463 (zone 4), l'image SHR se traduit par l'apparition de réflecteurs continus et visibles sur toute la profondeur investiguée (Figures 5). D'après un calage effectué sur le plan des exploitations (Figure 8), cette zone d'environ 40 m de large, se situe directement après la limite ouest de la zone effondrée (zone 3). Elle correspond probablement à la structure du stot de protection qui sépare la zone de l'effondrement des exploitations qui ont suivi. La largeur (~ 40 m) du stot estimée à partir du plan des exploitations est équivalente à l'extension latérale de l'image SHR de la zone 4.

### **5.4 Analyse des zones 5 et 6**

L'image SHR de la zone 5 située dans la partie ouest du profil met en évidence une nette disparition des réflecteurs profonds et un affaiblissement de l'interface Grande Mine entre les traces 253 et 423 (Figure 7). Ces observations suggèrent que cette zone a été exploitée, elle correspondrait aux exploitations reprises après l'occurrence de l'effondrement de 1879 sur une largeur d'environ 180 m (Figure 8). On note que dans cette zone, l'état SHR du recouvrement (réflecteurs au-dessus de la Grande Mine) est très perturbé, encore plus que dans la zone effondrée. Ceci s'explique par la présence de failles géologiques et probablement de cavités peu profondes (~ à moins de 60 m) qui auraient induit un effet de masquage du réflecteur noté A.

A l'extrémité ouest du profil (traces 183 – 253), on retrouve la continuité latérale et verticale des réflecteurs qui représentent les caractéristiques SHR d'une zone vierge (zone 6).

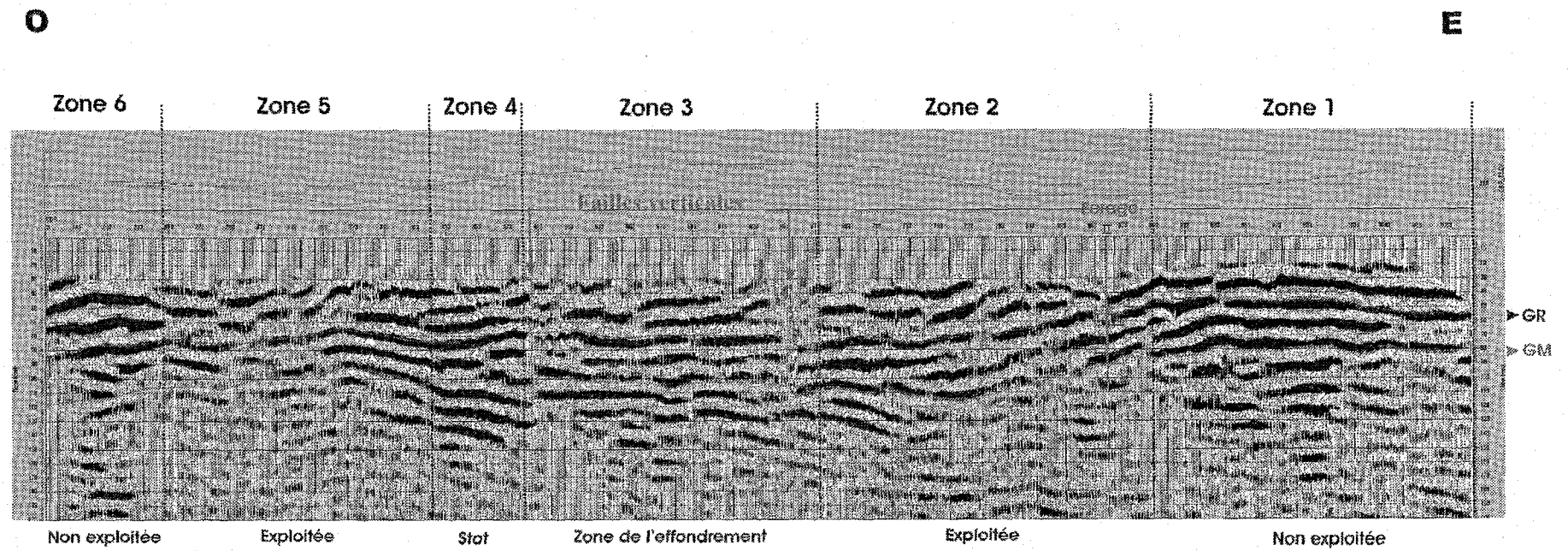


Figure 5. Interprétation de la section SHR.

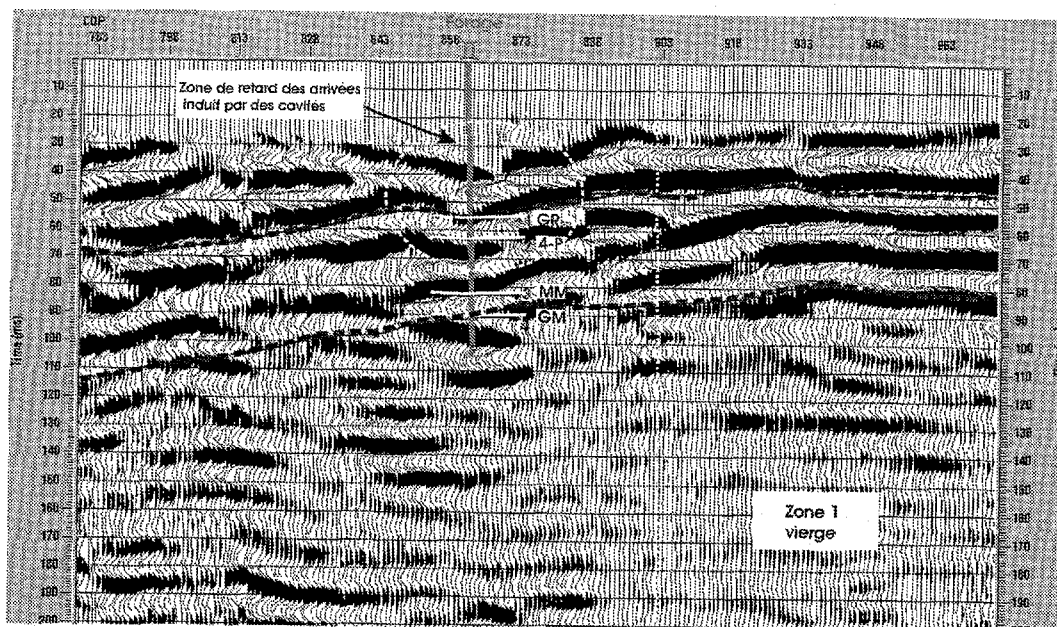


Figure 6. Imagerie SHR de la zone du forage.

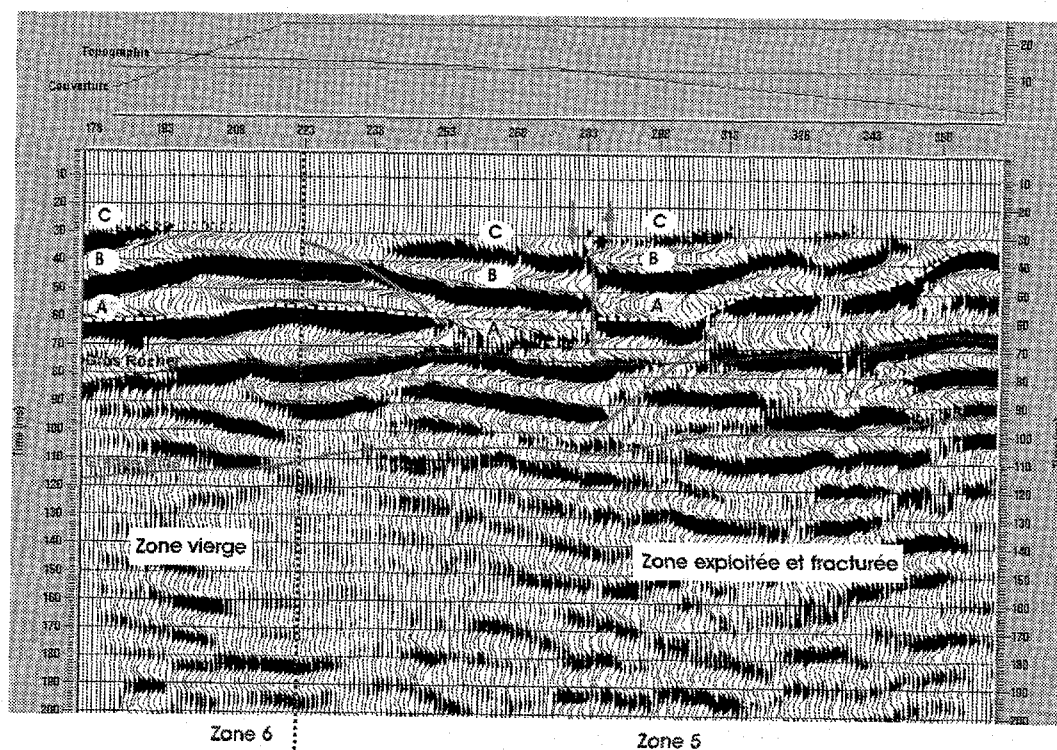


Figure 7. Imagerie SHR des zones 5 et 6 (extrémité Ouest du profil).

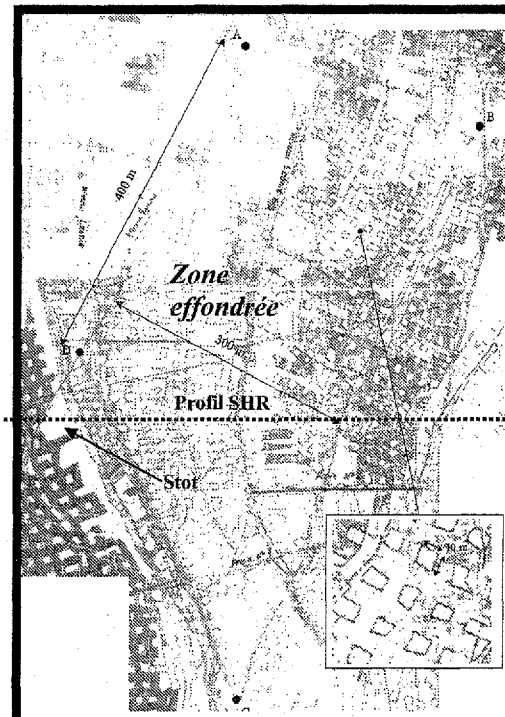


Figure 8. Situation du profil SHR par rapport au plan de mine.

## 6. Conclusion

La technique de la sismique réflexion haute résolution a été testée sur le site sous-miné de Gréasque pour la localisation et la reconnaissance de l'état des cavités souterraines. Les images SHR obtenues ont fait l'objet de traitements et d'analyses spécifiques qui ont permis d'identifier les structures traversées par les ondes sismiques. Sur la section SHR du profil réalisé à l'aplomb d'une ancienne mine de charbon, nous avons observé différents comportements de la signature sismique selon les zones traversées. On distingue notamment :

- des parties exploitées (effet de cavités Grande Mine et Mine de Gréasque) ;
- des zones vierges (aucun effet de cavité) ;
- **une zone exploitée puis effondrée** (effondrement de 1879) ;
- un stot de protection .

Des anomalies liées à la propagation d'ondes au sein des cavités ont pu être identifiées. Ces cavités sont localisées au-dessus de la Grande Mine dont deux identifiées par le sondage à moins de 10 m de profondeur. Il est important de noter la complexité de cette analyse qui a nécessité la mise en œuvre d'une méthodologie pour un traitement spécifique. En effet, la géométrie d'acquisition du grand profil 2D a été

adaptée à des objectifs profonds (plus de 100 m). Or, la découverte inattendue par forage des cavités à faible profondeur nous a incités à les identifier sur la section SHR pour faciliter l'interprétation.

Dans la zone 3, nous avons mis en évidence la trace SHR de l'effondrement de 1879 sur 200 m de largeur. Les analyses effectuées en terme de localisation par rapport au profil, de signature SHR et des informations tirées des archives confirment cette interprétation.

Les résultats de cette expérimentation montrent que la technique SHR est un moyen intéressant et efficace pour détecter la présence de cavités et pour identifier leur état (effondré ou stable).

Le retour d'expérience des investigations SHR dans le cadre de la détection et de la caractérisation des cavités souterraines confirme l'importance de l'apport de cette technique pour l'évaluation du risque d'effondrement.

## 7. Références bibliographiques

- ALLEMAN G. 1996. High resolution seismic profiling applied to a heterogeneous area imaging and to cavity detection in Switzerland. *PhD, Université de Lausanne, Suisse.*
- COOK J.C. 1965. Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitude. *Geophysics* 30 pp. 527-538.
- DURAND J.P. 1984. Géologie du Bassin de l'Arc. *Revue de l'industrie Minérale.*
- DRIAD L., PIWAKOWSKI B. 2002. Detection and characterization of underground cavities using high resolution seismic reflection (HRSR). *Proceedings of the 8th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, 8-12, Aveiro, Portugal, pp.31-34*
- EISELT F., SHAHROUR I. 1992. Application of finite element method to seismic detection of near underground cavities. *Proceedings of the First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Brussels, pp. 351-358.*
- PIWAKOWSKI B. 1989. Contribution à la théorie de la réponse impulsionnelle de la diffraction. Exemple d'application : détection sismique des cavités souterraines. *Rapport d'habilitation, Université de Valenciennes.*
- PIWAKOWSKI B., SHAHROUR I. 1998. Imagerie du proche sous-sol par sismique haute résolution : application à la détection des cavités. *Bull. Lab. Ponts et Chaussées vol 214 pp (19-29).*
- MOREAUX D., PIWAKOWSKI B., SHAHROUR I. 1996. Finite element modelling of seismic imaging of underground cavities. *Proceedings 2<sup>nd</sup> Congress of Environmental & Engineering Geophysical Society, Nantes, France.*